

Article, Published Version

Stephani, R.

Erfassung und Optimierung des Aufspülprozesses

Mitteilungen der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau; Schriftenreihe Wasser- und Grundbau

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/106273>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Stephani, R. (1990): Erfassung und Optimierung des Aufspülprozesses. In: Mitteilungen der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau; Schriftenreihe Wasser- und Grundbau 55. Berlin: Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau. S. 134-146.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



mittelten Verkleinerungsfaktoren in die Vorausberechnung einbezogen werden, da die Kolkgeometrie keine relevanten Unterschiede aufweist.

6. Erfassung und Optimierung des Aufspülprozesses

Die Auswertung der kleintechnischen Versuche mit Wasser und Wasser-Sand-Gemischen sowie die theoretischen Schlußfolgerungen ermöglichen Aussagen

- a) zur Verbesserung des Aufspülens von Wasser-Feststoff-Gemischen durch konstruktive Gestaltung der Ausströmvarianten,
- b) zur Verbesserung des Aufspülens von Wasser-Feststoff-Gemischen durch Veränderungen in der technologischen Prozeßführung,
- c) zur Vorausberechnung des Kolkes und der damit gekoppelten Eingangsgrößen für die Projektierung der Aufspülfläche.

6.1. Verbesserung des Aufspülprozesses durch konstruktive Veränderungen

Die Versuche bestätigen, daß die theoretischen Betrachtungen zur Verringerung der Kolkentiefe und zur Verbesserung der Sedimentation mit konstruktiven Mitteln prinzipiell richtig sind. Als Ergebnis der konstruktiven Veränderungen (Abschnitt 4.1.) bei den Versuchen mit Klarwasser und Wasser-Sand-Gemischen liegen optimierte Ausströmvarianten vor.

Die Variante "diffusorartige Ausströmvorrichtung mit Schikanen" bietet für Klarwasser Vorteile. Zur Minimierung der Kolkentiefe bringt diese Lösung gegenüber dem Ausströmen aus dem waagerechten Rohr eine Verringerung von ca. 79 %. Bei Wasser-Sand-Gemischen eingesetzt, tritt gleichfalls die

geringste Kolktiefe auf. Die Ablagerungsquote im Aufspülbereich (V + VI) beträgt jedoch nur ca. 73 %. Deshalb sollte diese Variante bevorzugt dort eingesetzt werden, wo vordergründig eine kleine Kolktiefe mit einem breiten Spülfeldeinlauf angestrebt wird.

Wird eine maximale Ablagerungsquote im Aufspülbereich (V + VI) gefordert, ist die Variante "Prallblech gelocht, 30° nach hinten geneigt" (Bild 34), mit vorgeschaltetem Rohreindicker optimal. Durch sie wird im Aufspülbereich V + VI ($\approx 28 \times d_R$) eine Ablagerungsquote von ca. 93 % erreicht. Dabei entsteht eine um ca. 67 % größere Kolktiefe als bei der diffusorartigen Ausströmvorrichtung.

Zur Verbesserung der Ablagerungsquoten im Aufspülbereich eignet sich besonders der Einsatz des Rohreindickers mit geringem konstruktiven Aufwand. Es werden gute Ergebnisse erreicht. Die Ablagerungsquote erhöht sich bis zu 27 %. Wie die Versuche zeigten, ist durch konstruktive Änderung der Eindicker weiter optimierbar. Ansätze bieten sich in einer besseren Anpassung an die Strömungsverhältnisse im Rohr sowie an das Kornspektrum über dem Strömungsquerschnitt. Bereits durch eine 180°-Drehung des Rohreindickers gegenüber den ersten Versuchen (Bild 36) ergab sich eine Ablagerungsquote in annähernd doppelter Größe.

Während der Vorversuche wurden bei einer Eingangskonzentration von 5 % bis 7 % in der Hauptrohrleitung des Rohreindickers Sandkonzentrationen von 10 % bis 12 %, dagegen in der Nebenrohrleitung von 1,0 % bis 3 % gemessen.

Um für Aufspülvorgänge den optimalen Einsatz der Ausströmvarianten abschätzen zu können, werden in Tabelle 11 Einsatzgrenzen, erreichbare Effekte und für Vergleiche Näherungsgleichungen angegeben.

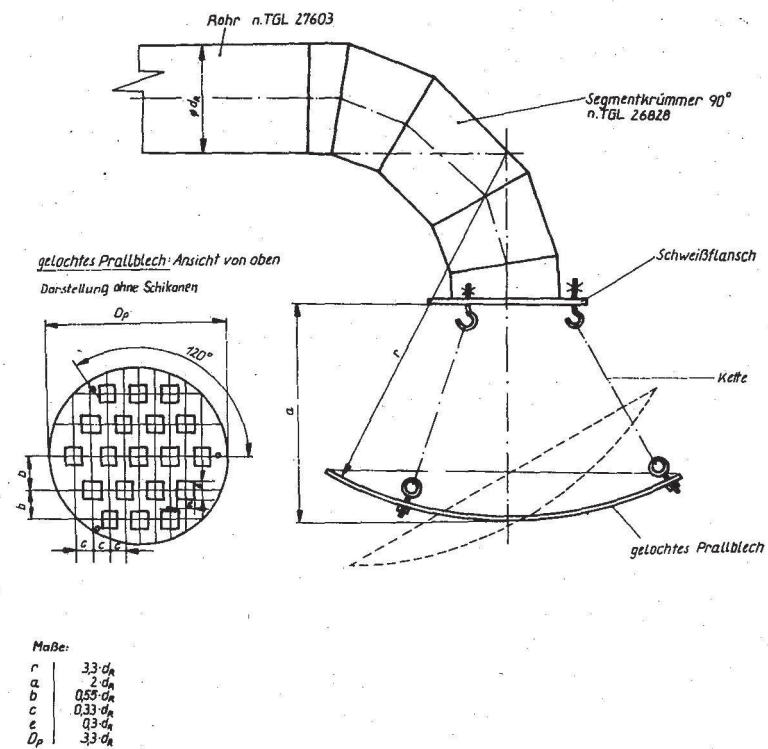


Bild 34 Prinzipdarstellung der Prallblechvariante

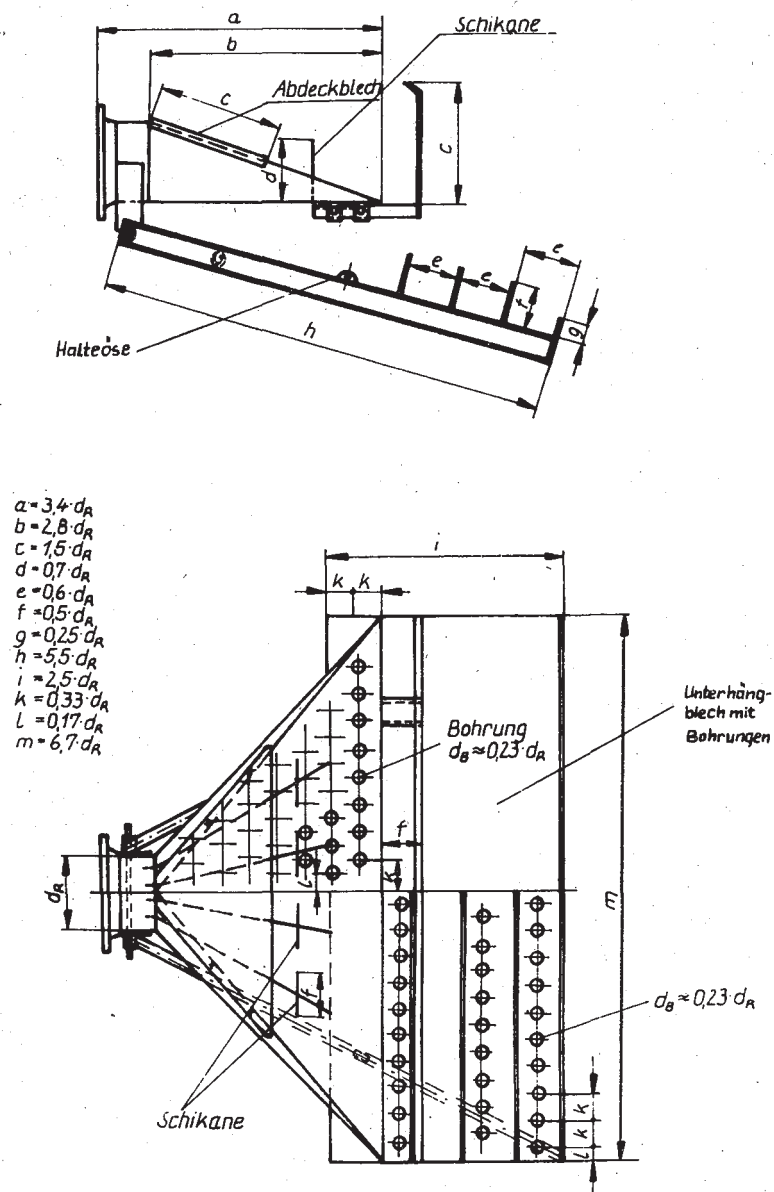


Bild 35 Prinzipdarstellung der optimierten diffusorartigen Ausströmvorrichtung

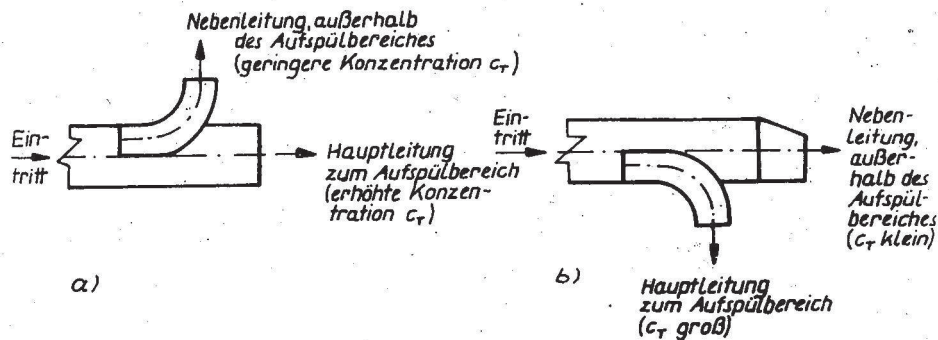







Bild 36 Einbauprinzip des Rohreindickers (Schnittdarstellung):
 a) in Vorversuchen;
 b) in Hauptversuchen.

6.2. Hinweise zur Verbesserung der Aufspültechnologie

Spülprozesse laufen unter praktischen Bedingungen oft zyklisch ab. Durch begrenzte Eingabekapazitäten des Feststoffes in das Rohrsystem oder spezifische Bedingungen auf dem Spülfeld erfolgt ein relativ kurzzeitiger Gemischtransport. Die zyklische Betriebsweise erfordert ein häufiges An- und Abfahren der Anlage mit Klarwasser, um Verstopfungen im Transportsystem zu vermeiden. Beispielsweise beträgt bei der Aufspültechnologie mit Schuten je nach Abmessungen der Schute und der Rohrleitung die Klarspülzeit ca. ein Viertel bis ein Drittel der Transportzeit. Das Klarspülen wirkt durch die Vergrößerung des Kolkes der angestrebten maximalen Ablagerung entgegen. Der bereits aufgespülte "Kolkpilz" wird durch das Klarwasser abgetragen. In Versuchen wurden Abtragungsverluste bis zu 20 % gemessen. Die Kolkabmessungen vergrößern sich dabei (Tabelle 10). Deshalb sollte die Klarspülzeit minimiert werden oder das Klarspülen ganz entfallen.

Tabelle 11 Zusammenfassung wesentlicher Kriterien zur Abschätzung des optimalen Einsatzes der Ausströmvarianten bis DN 600 für das Aufspülen von Wasser-Sand-Gemischen

Auström- variante	Einsatzgrenzen	Ereichbare Effekte	Näherungsleichungen für Klarwasser	Kolkaußen- durchmesser d_{ka} in m	Kolkab- flußbreite b_{km}			
	c_T	$\frac{d_R}{d_K}$ minimale Ausfluß- höhe h	$\frac{t_k}{t_{kmin}} \cdot \frac{b_k}{L/L_{max}}$	$T_n = t_k + h_u$				
	≥ 60	$\geq d_R$	4,8	0,8 (o.E.)	0,2	$3,5 \cdot \frac{h^{0,182} \cdot \sqrt{0,67}}{d_{85}^{0,136} \cdot \bar{w}_{krit}}$	$2,52 \cdot T + 0,41$	$0,5 \cdot d_{ka}$
	≥ 60	$\geq 2d_R$	3,8	0,8 (o.E.)	0,4	$2,4 \cdot \frac{h^{0,179} \cdot \sqrt{0,459}}{d_{85}^{0,134} \cdot \bar{w}_{krit}}$	$2,81 \cdot T + 0,36$	d_{ka}
	≥ 80	$\geq 4d_R$	1,8	0,9 (m.E.)	0,7	$1,1 \cdot \frac{h^{0,188} \cdot \sqrt{0,483}}{d_{85}^{0,134} \cdot \bar{w}_{krit}}$	$4 \cdot T + 0,95$	$2d_{ka}$
	≥ 80	$\geq 5d_R$	1,5	1,0	0,2	$1,0 \cdot \frac{h^{0,161} \cdot \sqrt{0,413}}{d_{85}^{0,12} \cdot \bar{w}_{krit}}$	$10,52 \cdot T - 0,15$	$0,7d_{ka}$
	≥ 125	$\geq 2d_R$	1,0	0,8	1,0	$0,76 \cdot \frac{h^{0,158} \cdot \sqrt{0,407}}{d_{85}^{0,119} \cdot \bar{w}_{krit}}$	$20 \cdot T - 0,09$	$3d_{ka}$

5 % bis 20 %

1,5 % bis 2,5 %

Anmerkung:

T	h	V	d_{85}	\bar{w}_{krit}
m	m	m ³ /s	mm	m/s

Mögliche Varianten sind gegeben

- a) durch das Umschalten vor dem Klarspülen auf eine Klarwasserspülleitung mit Hilfe einer Spülweiche, die kurz vor der Ausströmvorrichtung angeordnet wird. Das Spülwasser wird separat abgeleitet. Mit einem konstruktiv weiterentwickelten Rohreindicker ließe sich die Umschaltung auch ohne Spülweiche realisieren. Mit dieser veränderten Technologie könnte eine Verbesserung der Ablagerungsquote im Aufspülbereich ($\approx 28 \times d_R$) bei Einsatz der günstigsten Ausströmvariante (F 10) gegenüber dem waagerechten Ausströmröhr bei 1 Std. Aufspülzeit und 0,25 Std. Nachspülzeit von ca. 46 % erreicht werden.

- Verbesserung gegenüber dem waagerechten Ausströmen	26 %
- Wegfall des Verlustes durch Abtragung	20 %
Gesamtverbesserung der Ablagerungsquote	46 %

Der erreichbare Nutzen (Einsparung an Verschiebearbeit u. a.) rechtfertigt den erforderlichen einmaligen konstruktiven (Eindicker, Klarwasserspülleitung als Nebenleitung) und mehrmaligen technologischen Aufwand (Montageaufwand beim Vorstrecken der Rohrleitung). Ein exakter ökonomischer Nachweis ist objektabhängig zu führen (Bild 37).

- b) durch den Einsatz eines Rohrmolches zur Verringerung der Ablagerungsverluste. Der Molch trennt das Klarwasser zum Spülen vom Wasser-Sand-Gemisch und reinigt die Rohrleitung von Ablagerungen. Somit verkürzt sich die Spülzeit für die Rohrleitungen.

Die Versuche bestätigen weiter, daß mit der ermittelten optimalen Variante zum Aufspülen (F 10) auch gegen eine bereits vorhandene Böschung bei einem Mindestabstand von $10 \times d_R$ gespült werden kann, ohne daß größere Spülverluste auftreten. Bei der Festlegung der Spültechnologie muß von der Zielstellung für den Spülprozeß ausgegangen werden. Wird z. B.

vorrangig auf eine Minimierung der Kolkentiefe bzw. auf eine große Einlaufbreite in das Spülfeld orientiert, ist die Ausströmvariante F 15 anzuwenden;

wird jedoch vordergründig das Aufspülen (Erhöhung der Ablagerungsquote) angestrebt, sind die Ausströmvarianten F 10 oder F 3 einzusetzen.

6.3. Vorausberechnung der Kolkabmessungen bei Klarwasser

Es ist möglich, für die untersuchten Ausströmvarianten die Hauptabmessungen eines Kolkes (Tiefe, Außendurchmesser, Abflußbreite) sowie die Wasserhöhe, Gerinnebreite und die kritische Strömungsgeschwindigkeit am Gerinneanfang bei geneigter Aufspülfläche mit ca. 2 % Gefälle und ohne Wasserstau zu berechnen. Für nicht angegebene Ausströmvorrichtungen müssen erst durch Modellversuche die Eingangsgrößen für das Berechnungsverfahren ermittelt werden. Die Vorausberechnung beruht auf den gleichen theoretischen Ansätzen, wie sie bei der Versuchsauswertung (Abschnitt 5.3.1.) behandelt wurden.

Berechnungsschritte

1. Eingangsgrößen für die Vorausberechnung: h_0 , Spüldauer z , d_{85} , Q_F , Q_K , ν , d_R , c_T , f , μ , k , j , K , u , v , σ , p , C_m , r , s festlegen!
2. Kritische Strömungsgeschwindigkeit in der Rohleitung w_{krR} vorgegeben oder bei Sand wie folgt errechnen /4/!

$$w_{krR} = 12 \cdot \mu \left[g \cdot \left(\frac{Q_K}{Q_F} - 1 \right) \right]^{1/2} \cdot \left[d_R^2 \cdot c_T \cdot \left(\frac{d_{85}}{d_{kg}} \right)^{1/6} \cdot d_{85} \cdot \left(\frac{d_{85}}{d_{kg}} \right)^{1/2} \right]^{1/6}$$

$$\text{mit } d_{kg} = 10^{-3} \cdot \sqrt[3]{\frac{6 \cdot Q_F}{Q_K - Q_F}}$$

$$\frac{d_{85}}{d_{kg}} = 1, \text{ wenn } d_{85} \geq d_{kg}$$

$$3. w_R = 1,5 \cdot w_{kritR}$$

$$4. \dot{V} = \frac{\lambda}{4} \cdot d_R^2 \cdot w_R$$

5. h_u schätzen oder durch Spülfeldbedingungen vorgeben!

$$6. D = 4 \cdot h_u$$

$$7. \lambda = \frac{1}{f^{3/2} \cdot (2 \cdot \lg \frac{D \cdot f}{k} + 1,138)^2} \quad (\text{Näherung})$$

$$8. \bar{w}_{krit} = \sqrt{\frac{g}{\lambda}} \cdot w_{krit}^* \quad w_{krit}^* \text{ n. Abschnitt 2.3.2.}$$

9. Iterative Berechnung von λ und Nachrechnung von \bar{w}_{krit} !

$$10. h = k_o - h_u$$

$$11. T_n = K \cdot \frac{h_o^u \cdot \dot{V}^v}{d_{85}^u \cdot \bar{w}_{krit}^p}$$

$$12. d_{ka} = r T_n + s$$

$$13. h_{uerr} = \frac{\dot{V}}{\bar{w}_{krit} \cdot C_m \cdot d_{ka}} \quad \text{Bei Abschätzungen kann an dieser Stelle abgebrochen werden.}$$

14. $h_u > 0,001 \text{ m}$ Iteration ab 6.

$h_u \leq 0,001 \text{ m}$, dann

$$T = \frac{9,5 \cdot h^{0,20} \cdot h_{uerr}^{0,3} (j \cdot \dot{V})^{0,42}}{C_m^{0,42} \cdot d_{85}^{0,21} \cdot (r \cdot T_n + s)^{0,42}}$$

15. $|T - T_n| \geq 0,001 \text{ m}$, dann weitere Iteration ab 12!

6.4. Einhaltung der Ähnlichkeitsbedingungen

Sollen physikalische Vorgänge, die in Modellversuchen nachgewiesen werden, in gleicher Weise am Ausführungsobjekt ablaufen, so müssen die Modellkennzahlen des zutreffenden Ähnlichkeitsgesetztes gleich sein. Bei der Kolkbildung sind u. a. die Schwer-, Trägheits- und Reibkraft wirksam, deshalb sind für die Ähnlichkeitsbetrachtungen die Froude- und die Reynoldszahl anzuwenden. Bei der Ermittlung der mittleren kritischen Strömungsgeschwindigkeit am Kolkrand

$$\bar{w}_{\text{krit}} = \sqrt{\frac{g}{\lambda}} \cdot w_{\text{krit}}^*$$

wird diese Abhängigkeit von der Froude- und der Reynoldszahl (Abschnitt 2.3.2., 2.3.3. und Anlage 9) deutlich erkennbar.

$$\text{Froudezahl:} \quad Fr = \frac{\text{Trägheitskraft}}{\text{Schwerkraft}} = \frac{w^2}{g \cdot d}$$

$$\text{Reynoldszahl:} \quad Re = \frac{\text{Trägheitskraft}}{\text{Reibkraft}} = \frac{w \cdot d}{\nu}$$

Die Übertragbarkeit der ermittelten Modellbeziehungen bei der Kolkbildung ist gegeben, wenn dynamische Ähnlichkeit vorhanden ist, d. h. wenn

$$Fr_{\text{Modell}} = Fr_{\text{Objekt}} \text{ und}$$

$$Re_{\text{Modell}} = Re_{\text{Objekt}} \text{ sind.}$$

In diesem Fall müssen beide Ähnlichkeitsgesetze erfüllt werden, also auch:

$$Re \cdot Fr = \frac{w^3}{\nu \cdot g} = \text{konst.}$$

Wird für die Versuche als Fluid Wasser verwendet, muß $w =$ konstant für Modell- und Naturobjekt bleiben. Daraus leitet sich ab, daß auch die charakteristischen Längen (d_R bzw. d_{85})

konstant bleiben. Es liegt hier somit Identität vor.

Da bei der Kolkbildung die Schwerkkräfte und die Trägheitskräfte am Sandkorn dominieren (Abschnitt 2.1.4.), wird nur das Froude-Gesetz berücksichtigt. Die Reibungskräfte werden bei den Ähnlichkeitsbetrachtungen abstrahiert. Damit besteht nur eine quasi mechanische Ähnlichkeit.

Mit folgenden Maßstäben werden die modifizierten Gleichungen für die Kolkwassertiefe auf die Erfüllung des Froudegesetzes geprüft

Längenverhältnis $\frac{l}{l_1} = \alpha$

Volumenstromverhältnis $\frac{\dot{V}}{\dot{V}_1} = \alpha^{2,5}$

Für die Kolkgleichung

$$T = 9,5 \cdot \frac{h^{0,28} \cdot h_u^{0,3} \cdot v^{0,42}}{d_{85}^{0,25} \cdot c_m^{0,42} \cdot d_{ka}^{0,42}} \quad \text{wird}$$

$$\alpha = \frac{\alpha^{0,28} \cdot \alpha^{0,3} \cdot \alpha^{0,42} \cdot 2,5}{\alpha^{0,21} \cdot \alpha^{0,42}} = \alpha^{1,0}$$

Die Kolkgleichung erfüllt das Froudesche Ähnlichkeitsgesetz. Modell-Objektübertragungen sind also global möglich.

Die Überprüfung der Kolkgleichung für Überschlagsrechnungen

$$T_n = \left(\frac{9,5 \cdot j^{0,72}}{c_m^{0,72} \cdot a^{0,72}} \right)^{\frac{1}{1+0,72 \cdot n}} \cdot \frac{h^{\frac{0,28}{1+0,72 \cdot n}} \cdot v^{\frac{0,72}{1+0,72 \cdot n}}}{d_{85}^{\frac{0,21}{1+0,72 \cdot n}} \cdot \bar{w}_{krit}^{\frac{0,3}{1+0,72 \cdot n}}}$$

ergibt nur bei $n = 1$ ebenfalls die Erfüllung des Froudegesetzes.

$$\text{Beweis: } \alpha = \frac{\frac{0,28}{1 + 0,72 \cdot n} \cdot \frac{0,72 \cdot 2,5}{1 + 0,72 \cdot n}}{\frac{0,21}{1 + 0,72 \cdot n} \cdot \frac{0,3}{1 + 0,72 \cdot n}} = \alpha^{1,0}, \text{ da mit}$$

$$0,28 + 1,8 - 0,21 - 0,15 = 1 + 0,72 n$$

$$n = 1$$

ist.

Da die n-Werte (Tabelle 12) für die meisten Versuche und Berechnungsbereiche verschieden 1,0 sind, gilt die Übertragbarkeit der Ergebnisse nach der Näherungsgleichung auf das Objekt nur für die jeweiligen spezifischen Versuchsbedingungen. Die Berechnung ist nur für Abschätzungen oder für Näherungen anzuwenden.

Tabelle 12 Zusammenstellung der Exponenten n für die Grundmodellvarianten nach der Ersatzfunktion $d_{ka} = a \cdot T^n$

Versuchs-Nr.	Bereich	n
K 1	I	0,2684
	II	0,7484
	III	0,9432
K 2	I	0,2860
	II	0,6743
	III	0,9480
K 3	I	0,2123
	II	0,6885
	III	0,9229
K 4	I	0,2905
	II	0,7681
	III	0,9492
K 5	I	0,2036
	II	0,6776
	III	0,9187
K 6	I	0,6441
	II	0,9384
	III	0,9894
K 7	I	0,2627
	II	0,7430
	III	0,9415
K 8	I	1,0739
	II	1,0074
	III	1,0083
K 9	I	1,7528
	II	1,0561
	III	1,0083
K 10	I	1,5489
	II	1,0339
	III	1,0051